

УДК 550.834

Г.М. Дрогицкая

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
г. Киев*

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЭНДОГЕННЫХ РУДНЫХ РАЙОНОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ДРЕВНИХ ЩИТАХ

Новая интерпретация геологических и сейсмических данных позволила выявить корреляцию поверхностных структур эндогенных рудных районов Балтийского и Украинского щитов с рельефом поверхности раздела Мохо и локальными неоднородностями земной коры. В результате на основе согласованного анализа геологических и сейсмических данных построены модели глубинного строения Печенгского, Онежского и Кировоградского рудных районов, выполнено их сопоставление.

Ключевые слова: метод глубинного сейсмического зондирования, метод обменных волн землетрясений, поверхность раздела Мохо, кора, мантия.

Введение. Проблема соотношений рудных месторождений с глубинными неоднородностями литосферы – одна из важных в области геологии, геофизики и геохимии. Она разрабатывается в масштабах металлогенических провинций, металлогенических зон, рудных районов, отдельных крупных рудных месторождений и в разных направлениях.

Одно из направлений – создание интегральных глубинных моделей рудных районов, расположенных в докембрийских комплексах древних щитов, на основе согласованного анализа геологических и сейсмических данных. Модели ориентированы на выявление среднемасштабных неоднородностей коры и раздела кора–мантия и сопоставление этих неоднородностей с рудоносными поверхностными структурами.

Данный подход был разработан на примере Печенгского рудного района, развит при изучении Северо-Онежского синклинория на Балтийском щите, а также Кировоградского рудного района на Украинском щите. Все три рудных района сформировались в палеопротерозое и содержат эндогенные рудные месторождения мирового класса: Печенгский – магматические медно-никелевые месторождения с возрастом 2,0 млрд лет, ассоциированные с габбро-верлитовыми интрузиями и локализованные в палеопротерозойском осадочно-вулканогенном комплексе; Онежский –

месторождения хромитов, титаномагнетитов с платиноидами и золотом, а также урана–ванадия с комплексом других элементов; Кировоградский – гидротермальные метасоматические урановые месторождения, залегающие в палеопротерозойских гранитоидах и ультраметаморфических породах. Рудные районы детально исследованы геологическими и сейсмическими методами. В Печенгском и Онежском рудных районах сейсмические работы были сфокусированы на сверхглубоких скважинах, в Кировоградском – выполнены по системе пересекающихся профилей. Важно подчеркнуть, что в течение последующей геологической истории рудные районы не претерпели существенных преобразований.

Печенгский рудный район. Исследования глубинного строения данного района были начаты ИГЕМ РАН в 1971 г. с изучения разреза Кольской сверхглубокой скважины и осуществлялись в два этапа. На первом на основе корреляции разреза скважины и адекватных материалов по поверхности была построена модель до глубины 15 км. Она исходила из более широких, чем обычно, границ рудного района и позволила расшифровать внутреннее строение никеленосной Печенгской структуры. На втором этапе – создание модели до глубины 40 км, были использованы результаты сейсмотомографического изучения переходной зоны Балтийский щит–шельф Баренцева моря. В итоге под Печенгской структурой был зафиксирован локальный подъем раздела Мохо, интерпретированный как реликтовый мантийный плюм.

В последующие годы работы в Печенгском рудном районе развиваются по трем направлениям: а) обобщение многолетних структурно-петрологических исследований района и сопоставимых рудоносных площадей северо-восточной части Балтийского щита; б) интерпретация никеленосной Печенгской структуры как палеопротерозойского приразломного вулканического центра [12]; в) сопоставление тектонической позиции рудного района и его глубинного строения.

В связи с бурением Кольской сверхглубокой скважины в Печенгском рудном районе и на смежных площадях выполнены уникальные по плотности и методам сейсмические исследования. Для построения сейсмотомографического разреза “суша–море” [3] в базу данных были включены 4200 лучей P -волн и 2400 лучей S -волн, зарегистрированных от региональных профилей, промышленных и других мощных взрывов. В ГП “Невскгеология” сначала был построен один опорный разрез, представленный в виде вариаций V_p , V_s и отношения V_p/V_s на глубину 40 км и

по латерали, затем – детальная трехмерная модель участка, в центре которого находится Кольская сверхглубокая скважина.

Установлено, что в Печенгском районе континентальная кора делится на верхнюю гетерогенную и нижнюю гомогенную, различающиеся по значениям скоростных параметров. Граница между ними располагается на глубине от 20 до 25 км. Сопоставление данных ГСЗ и МОВЗ позволило определить положение и строение поверхности раздела Мохо. Он представлен двумя сейсмическими поверхностями, отстоящими друг от друга на 12 км. Его верхняя поверхность располагается на глубинах 34–41 км. Минимальные глубины в 34–36 км зафиксированы под Северным крылом Печенгской структуры, вмещающим медно-никелевые месторождения. Они отвечают изометричной в плане аномалии диаметром 35–45 км, интерпретированной как реликтовый мантийный плюм, точнее его кровля. Под ним на границе верхней и нижней коры выявлены аномалии с максимальными значениями V_p/V_s – признаки некогда существовавших промежуточных магматических камер.

В монографии “Кольская сверхглубокая” [4] Печенгская структура описана как грабен-синклиналь на архейском основании. После ее издания были опубликованы разнообразные плиттктонические модели Печенгской структуры, согласно которым слагающий его палеопротерозойский осадочно-вулканогенный комплекс или, по крайней мере, его верхняя часть представляют собой океаническую кору. Эти модели по существу исключали возможность связи рудоносных поверхностных структур с разделом Мохо. Но приведенные выше данные доказывают наличие такой связи, во всяком случае, в Северном крыле никеленосной Печенгской структуры.

Онежский рудный район. Исследования глубинного строения района на основе корреляции геологических и сейсмических данных направлены на установление связей его поверхностных структур и рудных месторождений с локальными неоднородностями коры и раздела коры-мантия.

Сейсмические работы методом обменных волн землетрясений (МОВЗ) в рудном районе были выполнены в 1980–1987 гг. с использованием стандартной методики. Расстояние между точками наблюдений составляло 3–5 км, длительность наблюдений на каждой точке 24–30 дней (до полного набора необходимой информации). В 2012 г. часть сейсмического материала по трем профилям была пересмотрена. Построен-

ные заново глубинные разрезы переобработаны с использованием программных пакетов “КОСКАД-3D” и Surfer 8 [5].

Для обработки трех профилей МОВЗ (I, II, 6) в Северо-Онежском синклинии использована методика статистической обработки обменных волн землетрясений, предложенная и опробованная в Кировоградском рудном районе (Украинский щит) [2].

На исходных глубинных разрезах МОВЗ [6] уверенно прослежены отдельные довольно протяженные границы в коре, а также поверхности M_I и M_{II} , соответствующие кровле и подошве переходной зоны кора–мантия, четко картируются зоны нарушений различной глубины заложения.

Кроме информации о плотности распределения точек обмена по профилю особый интерес представляет динамический параметр обменоспособности среды A_{PS}/A_p , где A_{PS} – интенсивность обменной волны, A_p – интенсивность продольной волны. Этот параметр меньше остальных зависит от условий проведения эксперимента: времени и длительности наблюдения, расстояния между станциями и т. д., и является объективной характеристикой физического состояния границ и поверхностей обмена.

В Онежском рудном районе зафиксированы резкие колебания значений указанного параметра даже при прослеживании вдоль одной и той же границы (рис.1). Данное обстоятельство может свидетельствовать об изменении физического состояния границ раздела по латерали. Значительные изменения обменоспособности среды фиксируются вблизи зон нарушений, что указывает на повышение флюидопотоков в зонах повышенных значений обменоспособности (так называемые нежесткие контакты) [11].

Следует отметить, что количество обменных волн на построенном разрезе характеризует степень гетерогенности геологической среды, а интенсивность обменных волн зависит от таких физических свойств, как трещиноватость, напряженность, жесткость, флюидонасыщенность и изменения скоростных параметров по разные стороны границ разделов. Статистический анализ исходных данных выполнен однотипно для всех трех профилей.

Установлено, что месторождения пространственно связаны с андерплейтинговым слоем повышенной мощности, где, вероятно, проходила в палеопротерозое (от 2,45 до 1,7 Ga) главная дифференциация мантийных магматических расплавов суммийской и людиковийской крупных магматических провинций с отделением флюидных и рудных фаз. Она со-

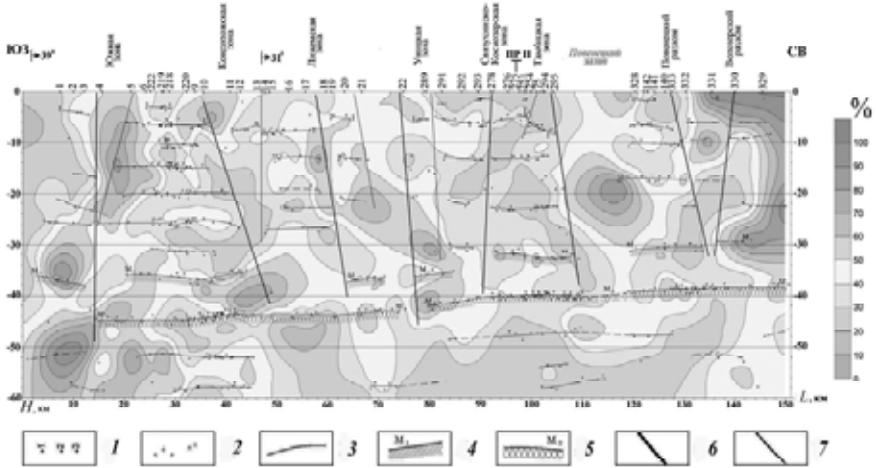


Рис. 1. Глубинный разрез и обменоспособность среды в изолиниях A_{ps}/A_p (отношение амплитуд обменной волны и образовавшей ее продольной волны, %). Онежский рудный район (Сост.: Исанина Э.В., Дрогицкая Г.М.), профиль I (Сямозеро-Кондопога-Повенецкий залив): 1 – пункты сейсмологических наблюдений и их номера; 2 – точки проявления обменных волн; 3 – границы обменов; 4 – кровля зоны перехода кора–мантия; 5 – подошва зоны перехода кора–мантия; 6 – мантийные разломы, разрывающие границы M_I и M_{II} ; 7 – внутрикоровые разломы

здавала благоприятные условия для последующего внедрения обогащенных металлами магматических расплавов в верхние уровни коры и образования там месторождений хромитов и титаномагнетитов с сопутствующими элементами. Метасоматические комплексные уран-ванадиевые руды формировались на свекофеннском тектоническом (1,8–1,7 Ga) этапе, на котором происходило существенное преобразование коры и который сопровождался вепсийским основным магматизмом и связанным с ним интенсивным флюидообразованием под воздействием мантийного диапира.

Кировоградский рудный район. Расположен в центральной части Украинского щита, для которой характерно наиболее мощное проявление палеопротерозойского интрузивного магматизма и эндогенного рудообразования. В металлогении района главную роль играют гидротермальные урановые месторождения, составляющие основу минерально-сырьевой базы урана Украины. Три из них разрабатываются, два переданы добывающей промышленности, еще одно подготавливается к эксплуатации. В рудном районе известны также небольшие жильные мало-

сульфидные месторождения золота и высокотемпературные метасоматические месторождения лития.

Важная особенность Кировоградского рудного района – пространственное совмещение двух крупных палеопротерозойских интрузивных массивов: внутрикорового Кировоградско-Новоукраинского гранитоидного и Корсунь-Новомиргородского рапакиви-анортозитового. Они образуют единый Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородский плутон, который протягивается с юга на север на 150 км и определяет общий план поверхностных структур района [8]. Первый массив сложен новоукраинским и кировоградским интрузивными комплексами, второй – одноименным рапакиви-анортозитовым комплексом.

По данным изотопного датирования по цирконам и монацитам, новоукраинский и кировоградский комплексы образовались в интервале 2,06–2,02 млрд лет назад, корсунь-новомиргородский комплекс – 1,75–1,72 млрд лет назад [10]. Остальную площадь занимают стратифицированные породы ингуло-ингулецкой серии, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации. Возрастные границы стратифицированного комплекса оцениваются в 2,3 и 2,1 млрд лет.

Кировоградско-Новоукраинский массив образовался в температурных границах амфиболитовой фации путем частичного плавления сиалической коры и в процессе формирования испытал сильные деформации сжатия, что привело к появлению текстур течения и пластической перекристаллизации пород. Вместе со стратифицированными породами он образует интрузивно-ультраметаморфический цоколь Кировоградского района. Корсунь-Новомиргородский массив занимает по отношению к нему автономное положение. Образование рапакивигранитсодержащих магматических комплексов обусловлено деятельностью мантийных источников и процессами мантийно-корового взаимодействия.

Урановые месторождения Кировоградского рудного района относятся к особому генетическому и промышленному типу натровых метасоматитов или месторождений натрий-урановой формации.

Урановые месторождения сосредоточены в Кировоградско-Новоукраинском гранитоидном массиве и сопряженных с ним Кировоградской и Звенигородско-Анновской зонах разломов и группируются в рудные поля. В Кировоградской зоне разломов находятся Мичуринское и Лелековское, в Кировоградско-Новоукраинском массиве – Новоконстантиновское и Партизанское урановорудные поля. К Звенигородско-Аннов-

ской зоне приурочено Ватутинское урановорудное, а также Станковатское редкометальное рудное поле, содержащее литиевые месторождения. Все рудные поля сосредоточены в широкой (30–35 км) полосе, дискордантной по отношению к общему субмеридиональному простиранию поверхностных структур Кировоградского рудного района.

Площадь рудного района изучена сейсмическими методами по широтным и субмеридиональным профилям, пересекающимся друг с другом. В 1970–1980-х годах были выполнены профильные исследования методами ГСЗ–КМПВ, МОВЗ и на отдельных участках – площадные исследования МОВ–ОГТ. Ведущее место среди них занимал метод ГСЗ. Его применение позволило определить скоростные параметры и мощность земной коры, изучить ее тонкослоистую структуру и переходную зону кора–мантия. Результаты этих исследований изложены в многочисленных публикациях. Наиболее полный обзор приведен в работе [7]. На приложенной к ней структурной схеме раздела Мохо Украинского щита и смежных территорий было показано, что в районе г. Кировоград морфология раздела Мохо отличается от таковой на остальной площади щита. Району присуща сложная комбинация субмеридиональных и субширотных изолиний раздела Мохо. В то время указанная аномалия не привлекла внимания.

В 2005–2006 гг. исходные данные ГСЗ были переинтерпретированы с использованием современного программного обеспечения. В базу данных были включены сейсмические профили, проходящие в непосредственной близости от Мичуринского, Лелековского, Новоконстантиновского и Ватутинского урановорудных полей. В результате обнаружена пространственная связь урановых месторождений и сопровождающих их месторождений золота и лития с широтным прогибом в рельефе поверхности раздела Мохо [1]. Ось широтного прогиба, названного мантийным рвом, смещена к югу на 10–15 км от г. Кировограда В восточной части прогиба раздел Мохо располагается на максимальной глубине 45–46 км. В западном направлении его глубина уменьшается до 44–43 км. По изолинии 43 км длина прогиба составляет около 100 км при ширине от 25 до 40 км. Урановые месторождения Мичуринского рудного поля проецируются на самую глубокую часть мантийного рва, урановые месторождения Лелековского, Новоконстантиновского и Ватутинского рудных полей – на его северный прибортовой склон.

В 2009 г. для прослеживания на глубину Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородского плутона и слагающих его массивов был использован МОВВ со статистической обработкой исходных данных по широтным и субмеридиональным профилям. Для трансформации исходного поля обменов выбраны три параметра: обменонасыщенность среды, обменоспособность среды и кратность обменов в одной и той же точке. В дальнейшем приоритет был отдан параметру обменоспособности A_{PS}/A_P , поскольку он меньше зависит от условий эксперимента: времени наблюдения и расстояния между станциями.

Статистический анализ обменных волн землетрясения выявил различную протяженность по вертикали Кировоградско-Новоукраинского и Корсунь-Новомиргородского массивов. Как видно на меридиональном профиле ИМ (рис. 2), в целом плутон характеризуется повышенными значениями обменоспособности среды. Но их распределение неравномерно по горизонтали и глубине. Под Корсунь-Новомиргородским массивом установлены две аномалии. Первая захватывает почти весь массив и достигает максимальных значений на глубинах 9–10 км. Вторая аномалия обнаружена на глубине около 40 км, вблизи раздела Мохо. Она имеет меньшие размеры, но соизмерима с первой по интенсивности. В верхней части Кировоградско-Новоукраинского гранитоидного массива

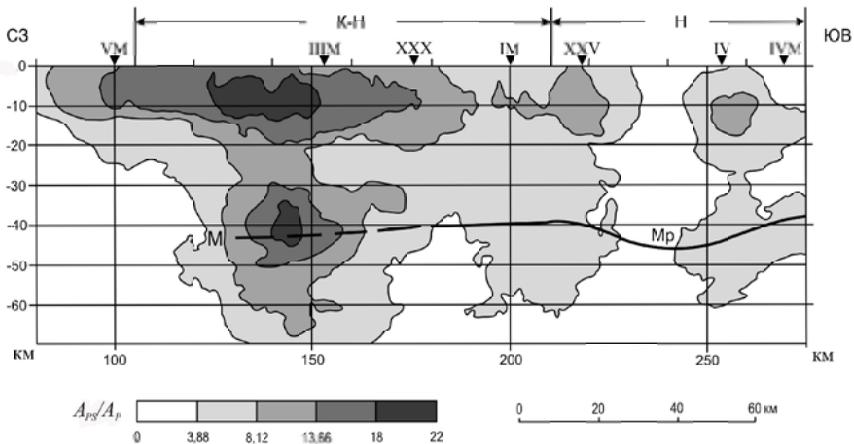


Рис. 2. Обменоспособность среды в вертикальном продольном сечении Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородского плутона. К-Н – Корсунь-Новомиргородский анортозит-рапакиви-гранитный плутон, Кировоградско-Новоукраинский гранитоидный массив, М – поверхность раздела Мохо, МР – мантийный ров

также зафиксирована аномальная зона, но с несколько пониженными значениями обменоспособности. Однако на более низких уровнях аномалии под ним не обнаружены.

Полученные сейсмические данные служат независимым подтверждением внутрикорового генезиса Кировоградско-Новоукраинского массива и подкоровой природы Корсунь-Новомиргородского массива. Размеры более глубинной аномалии Корсунь-Новомиргородского массива меньше, чем приповерхностной. Возможны два объяснения: аномалия связана с непосредственным продолжением рапакиви-анортозитового массива или отражает положение ранее существовавшего промежуточного магматического очага. Особого внимания заслуживает вертикальный разрыв поля обменных волн над “мантийным рвом”. В этом разрыве значения параметра A_{PS}/A_P уменьшаются до фоновых. Природа разрыва неясна, но он служит косвенным доказательством связи мантийного рва с расположенными над ним месторождениями урана, золота и лития.

Заключение. Балтийский щит, где расположены Печенгский и Онежский рудные районы, и центральная часть Украинского щита, где находится Кировоградский рудный район, детально исследованы сейсмическими методами. По сочетанию сейсмических методов и их плотности наблюдений этим территориям нет аналогов на докембрийских щитах Северного полушария Земли.

Сейсмические профили пересекали палеопротерозойские структуры, метаморфические и магматические комплексы, прошли в непосредственной близости от крупных магматических и гидротермальных месторождений. Поэтому в Печенгском, Онежском и Кировоградском рудных районах на основе корреляции геологических и сейсмических данных удалось выявить среднemasштабные неоднородности земной коры и раздела Мохо, определить пространственную связь с ними поверхностных структур и рудных месторождений.

В Печенгском рудном районе обнаружен локальный подъем раздела Мохо, или реликтовый мантийный плюм, установлено, что над предполагаемым мантийным плюмом располагаются магматические медно-никелевые месторождения, ассоциированные с мантийными габбро-верлитовыми интрузиями.

В Онежском рудном районе месторождения пространственно связаны с наличием повышенной мощности андерплейтингового слоя, где в

палеопротерозое, вероятно, проходила главная дифференциация мантийных магматических расплавов с отделением флюидных и рудных фаз. Она создавала благоприятные условия для последующего внедрения обогащенных металлами магматических расплавов в верхние уровни коры.

В Кировоградском рудном районе с помощью статистического анализа обменных волн землетрясений определено поведение на глубину внутрикорового Кировоградско-Новоукраинского гранитоидного и Корсунь-Новомиргородского рапакиви-анортозитового массивов и даны количественные оценки вертикальной протяженности структур интрузивно-ультраметаморфического цоколя, натровых метасоматитов и урановых руд. Под гидротермальными метасоматическими урановыми месторождениями зафиксирован локальный ров в рельефе поверхности раздела Мохо.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в рудных районах расположенных на древних щитах, локальные неоднородности коры и раздела Мохо и соотношения с ними эндогенных рудных месторождений не могут быть описаны какой-то одной моделью.

1. *Дрогицкая Г.М.* Сейсмогеологическая позиция Кировоградского рудного района (Украинский щит) в связи с локальными неоднородностями поверхности Мохо / Г.М. Дрогицкая, А.А. Трипольский, Н.И. Попов и др. – Геофизика XXI столетия 2006 год: Сб. тр. Восьмых геофиз. чтений им. В.В.Федынского (Москва, 2–4 марта 2006 г). – М., 2007. – С. 21–27.
2. *Дрогицкая Г.М.* Расслоенность земной коры Ингульского мегаблока (Украинский щит) по данным обменных волн землетрясений / Г.М. Дрогицкая // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2011. – С. 109–121.
3. *Исанина Э.В.* Глубинное строение и сейсмогеологические границы Печенгского района на Балтийском щите и смежной части шельфовой плиты Баренцева моря // Э.В. Исанина, М.Л. Верба, Н.М. Иванова, В.И. Казанский, Н.В. Шаров // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42, № 5. – С. 476–487.
4. *Кольская сверхглубокая.* Исследования глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Отв. ред. Е.А.Козловский.– М.: Недра, 1984.– 490 с.
5. *Никитин А.А.* Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных “КОСКАД-3D” / А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексашин – М.: Моск. гос. геолого-разв. ун-т, 2004. – 158 с.
6. *Онежская палеопротерозойская структура* (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. – 431 с.
7. *Соллогуб В.Б.* Литосфера Украины / В.Б. Соллогуб. – Киев: Наук. думка, 1986. – 184 с.

8. *Старостенко В.И.* От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит). I / В.И. Старостенко, В.И. Казанский, Н.И. Попов, Г.М. Дрогицкая, В.Б. Заяц, О.Ф. Макивчук, А.А. Трипольский, М.В. Чичеров // Геофиз. журн. – 2010. – Т. 32, № 1. – С. 3–33.
9. *Шаров Н.В.* Глубинное строение и металлогения Северо-Онежского синклиория (Республика Карелия, Россия): корреляция геологических и сейсмических данных / Н.В. Шаров, В.С. Куликов, Э.В. Исанина, Г.М. Дрогицкая, В.И. Казанский // Геофиз. журн. – 2013. – Т. 35, № 4. – С. 16–28.
10. *Щербак Н.П.* Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой / Н.П. Щербак, Г.В. Артеменко, И.М. Лесная. – Киев: Наук. думка, 2008. – 239 с.
11. *Яновская Т.Б.* Влияние нежесткости контакта упругих сред на коэффициент отражения, преломления и обмена / Т.Б. Яновская, Л.А. Дмитриева // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1991. – № 5. – С. 17–22.
12. *Kazansky V.I.* The Paleoproterozoic Pechenga Cu-Ni ore field (Fennoscandian shield): a fault-bound volcanic center / V.I. Kazansky, K.V. Lobanov, E.V. Isanina, N.V. Sharov // Izvestya. Earth Sciences Section. Russian Academy of Natural Sciences, Special issue. – Oslo, 2008. – P. 43–48.

Особливості глибинної будови ендегенних рудних районів, що розташовані на давніх щитах Г.М. Дрогицька

Нова інтерпретація геологічних і сейсмічних даних дала змогу виявити кореляцію поверхневих структур ендегенних рудних районів Балтійського і Українського щитів з рельєфом поверхні поділу Мохо і локальними неоднорідностями земної кори. В результаті на основі узгодженого аналізу геологічних і сейсмічних даних побудовано і зіставлено моделі глибинної будови Печенезького, Онезького та Кіровоградського рудних районів.

Ключові слова: метод глибинного сейсмічного зондування, метод обмінних хвиль землетрусів, поверхня поділу Мохо, кора, мантія.

Features of the deep structure of endogenous ore districts located on ancient shields G. Drogićka

New interpretation of geological and seismic data has revealed a correlation of surface structures of endogenous ore districts of the Baltic and Ukrainian shields Moho topography and local inhomogeneities of the crust. As a result the model of the deep structure of Pechenga, Onega and Kirovograd ore districts, based on a agreed analysis of geological and seismic data were constructed and performed their comparison.

Keywords: method of the deep seismic sounding (DSS), method of converted waves of earthquake (MCWE), M-discontinuity, crust, mantle.